

果実の熟度判定に関する音波共振法の応用

I. 共振用果実支持台の検討と収穫前後におけるマスクメロンの共振曲線

小 島 孝 之・田 中 政 信*

(園芸工学教室)

昭和 51 年 4 月 30 日 受理

The Application of Sonic Techniques to Evaluating Maturity of Fruits

I. A model of a fruit-holder and the resonant curves of musk-melon (*Cucumis melo* L.) in pre- and post-harvest

Takayuki KOJIMA and Masanobu TANAKA*

(Laboratory of Food Science and Horticultural Engineering)

Received April 30, 1976

Summary

Evaluation of maturity was carried out on several musk-melon fruits at different ripening stages by using a sonic resonant technique as a nondestructive evaluation method, and possibility of a practical use of it was discussed.

1) The B and C types, as shown in Fig. 3, gave more reasonable patterns in the resonant curves for judging the fruit maturity than the A type.

2) The resonance in the high range frequency damped and disappeared with the progress of ripening of the fruit.

3) After harvest, the resonant curves shifted to the lower frequency range, and less resonant amplitude occurred by the increase of the damping factor of the fruit with the advance of the maturity.

4) When we took the resonant vibration for longitudinal mode and calculated Young's moduli according to the equation (1), the suitable mode number n was 2 for the first resonant vibration and 4 or 5 for the largest resonant vibration.

From the above results, we concluded that the sonic technique is one of the promising method of the fruit maturity.

緒 言

国民生活レベルの向上は食生活の多様化をもたらした。特にそれは果実・野菜の消費量を大巾に増大させるとともに、これら果実・野菜の高級化や規格化を招いた。この現象は産地におけるビニールハウス、ガラス温室など園芸施設と施設園芸農法の発達により一層促進され、固定化しつつある。

生産農家では需要の伸びに合わせて高級果実・野菜の栽培面積を拡大しようとしているが、集約的な技術と管理が要求されるためにこの分野の拡大は思うようにはいかない。特に、栽培面積

* 佐賀県農業試験場

の拡大は収穫時における果実の熟度あるいは品質判定などの作業において大きなネックとなっている。たとえば、本実験に用いたマスクメロンにおいても、品質のよいものを出荷するためには授粉後の日数を記録しそれぞれの品種に適した時期に収穫しなければならないが、これらを大量に生産する場合には、授粉作業、管理作業などはもとより収穫判定の基準となっている日数管理でさえ多くの労力を必要とする。

熟度判別法には、この他果実の大きさ、色、葉の色の变化などにより経験的に判定する方法がある。しかしよほどの熟練者でない限り果実熟度の判定をあやまる場合があり、ときにはこれが市場価格の下落の原因となることがある。

したがって、高級果菜類、たとえばマスクメロンなどではその収穫時期を適確に、非破壊的に判断できる方法・技術の開発が望まれているところである。

本報では、マスクメロンの非破壊的熟度判別法に音波共振法を応用し、その実用性を検討するための基礎実験を行った。

材料および方法

1. 供試材料

佐賀大学農学部附属農場（佐賀市久保泉町）で栽培生育中のマスクメロンと佐賀県農業試験場（佐賀市川副町）で栽培生育中および収穫後のマスクメロンを供試した。

品種はフカミドリ *Cucumis melo* L. cultivar. FUKAMIDORI, およびコサック *C. melo* L. c.v. KOSAKKU を主として用いた。収穫後の試料としてはフカミドリとコサックをそれぞれ31個、計62個供した。試料の大きさは生育中のものはその段階によって異なるが、たて（極軸方向直径）が10.4から13.2cmの範囲、よこ（赤道面直径）が10.0から13.0cmの範囲であった。

果実重量は収穫後に供試したコサックが平均1073.7g、フカミドリが平均1150.7gであった。

フカミドリは、1972年新潟園芸試験場で育成されたもので、果皮は濃緑色、緑肉で日持ちはごくよいとされている。糖度も高く、栽培し易い性質をもっていて、成熟日数は55日から60日程度である。

コサックは1971年日本園芸生産研究所で育成されたもので、果皮・果肉とも緑色で、日持ちはよいとされている。また、成熟日数はコサック1号で50日から55日、2号で55日から60日程度である^{4,5)}。

2. 実験装置および測定方法

Fig. 1 に実験装置の概要を示した。装置は次に示す機器で構成した。

- ① 発振器：国際機械振動研究所製，PET-OA 型
- ② カウンタ：松下電器製，VP-404A 型
- ③ スピーカ：パイオニア，PIM-16A
- ④ 振動計：リオン K. K., VM-02 型
- ⑤ ピックアップ：リオン K. K., PV-11A, 3.1mV/G, 重さ約 1g

すなわち、発振器①から低周波の電氣的振動をスピーカ③に与えて可聴域の音波を作り出す。この音波は果実支持台⑥の内側の気柱⑦を平面波として進行し、上端で支持されている果実試料に到達する。到達した音波の一部は果実内に伝播し、この音波の周波数と試料の固有振動数が一致したときにその試料の振動が最大となる。音波を与える側と反対側の果実表皮に両面接着テープにより接着した加速度型ピックアップ⑤がその試料の振動を検出する。

発振器①の周波数を変化させながら果実上面の振動加速度を振動計④で読みとり図示していく

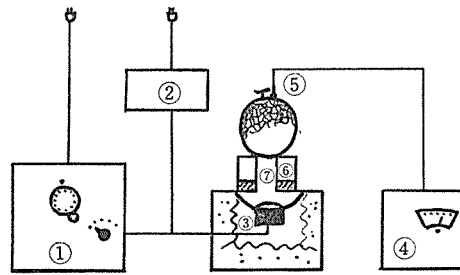


Fig. 1. Experimental arrangement for exciting and measuring the response within an intact fruit;

① Oscillator, ② Frequency Counter, ③ Speaker Box, ④, ⑤ Accelerometer and the Pick-up ⑥ Fruit-holder, ⑦ Air Column.

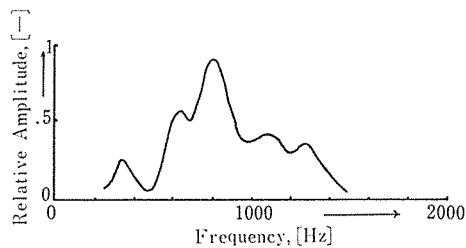


Fig. 2. Resonant curve for an intact musk-melon. *Cucumis melo* L. cultivar. KOSAKKU, at harvest (June 18, 1974)

と, Fig. 2 のような共振曲線が得られる. この共振曲線のピークがその果実試料の共振点, すなわち固有振動数とみなされる. この固有振動数は物質の違い, すなわち果実の種類, 品種, 大きさ, 熟度, 密度, テクスチャ, 形状あるいは果実への振動の与え方などによって異なることが知られている^{1,2,3,7,8)}.

2-1. 使用した果実支持台の型

果実支持台の型は以下に説明する A, B, C 型の 3 種を用いた (Fig. 3).

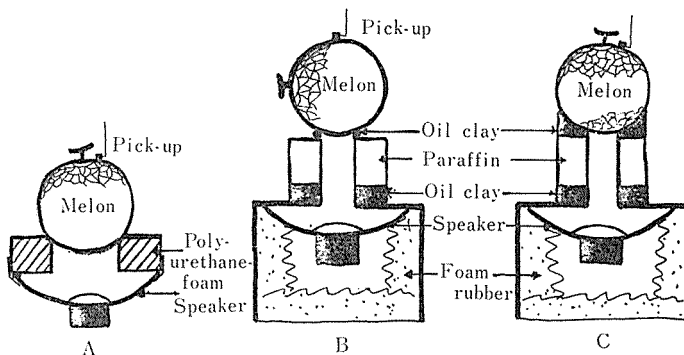


Fig. 3. Fruit-holders used in the experiment: from left to right; Type A, B, and C.

A 型果実支持台はスピーカー前面に発泡スチロール製の円筒支持台 (内径 7cm, 外径 18cm, 高さ 5cm) を装着したもので非常に軽い.

B 型果実支持台は厚さ約 1cm の合板で $22 \times 22 \times 12$ cm の大きさのスピーカボックスに、スピーカを取付けたものである。スピーカボックスの内側および裏側には吸音材としてフォームラバを詰めた。このスピーカボックスの上にパラフィンと油粘土を用いて円筒状の果実支持台を作成し、Fig. 3・B に示すような形とした。

C 型果実支持台はほぼ B 型のもと同じであるが、果実の支持接触面積を大きくした (Fig. 3・C)

果実支持台は B, C 型とも同筒型で、内径 4cm, 外径 15cm, 高さ 6cm (スピーカボックス上面から試料までの距離) である。

実験結果

1. A 型果実支持台による生育中のマスクメロンの音波共振曲線

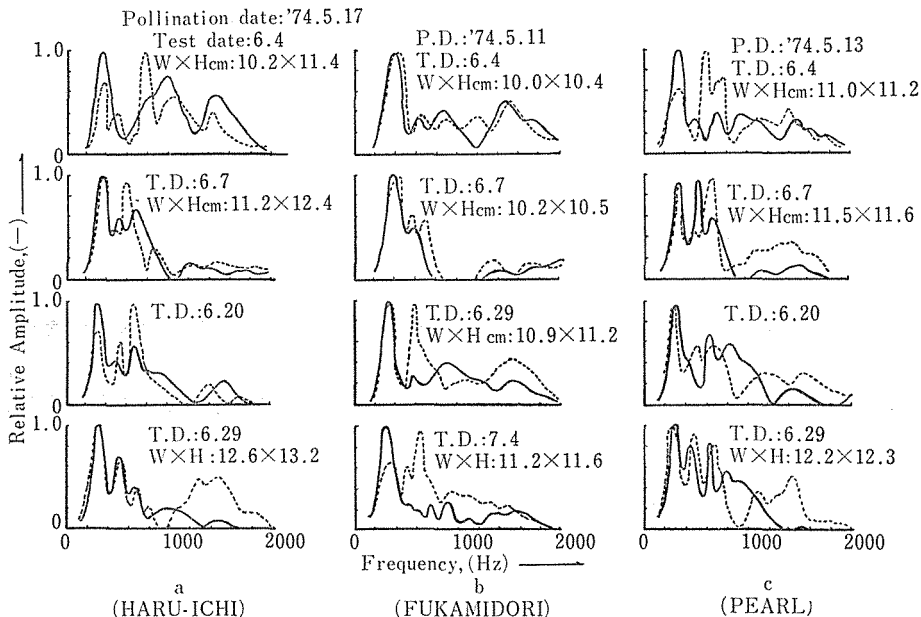


Fig. 4. Resonant curves for intact fruits during growing and development with A-type fruit-driver: W; equatorial diameter of the fruit (cm), H; height of the fruit (cm),; E→W, —; N→S.

ハウス内で生育中のメロン (品種; 春一, パール, フカミドリ) について, 現地で共振実験を行い, それらの共振曲線を求めると, Fig. 4 に示すような結果となった。これらの測定結果は収穫前3週間から4週間の生育段階のものであるが, この中には格別顕著な変化はみい出されなかった。

果実への音波の与え方は Fig. 1 および 3・A, B に示すような方法である。音波を与える方向については Fig. 4 の場合では2とおり, すなわち果頂部から果底部への極軸方向 (N→S) とこれに直角な赤道面の直径方向 (E→W) とした。しかし, 前述のようにそれらいずれの場合の共振曲線にも, 明確な経時的な変化を見出すことはできなかった。

2. B型果実支持台による生育中のメロンの音波共振曲線

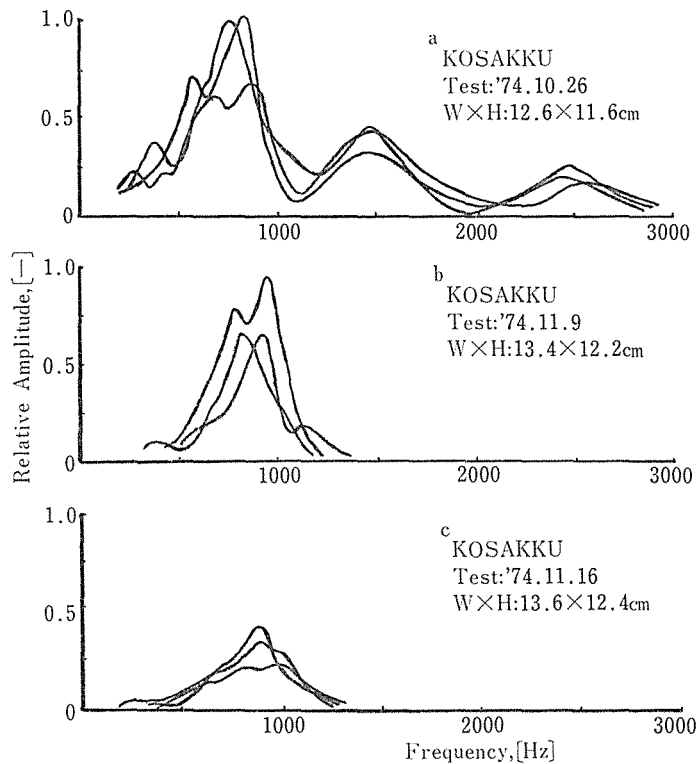


Fig. 5. Resonant curves for intact fruits during growing stage on the B-type fruit-holder

B型果実支持台を用いて、同じように現地測定を行なったところ、Fig. 5のような結果を得た。試料はコサックメロンであるが、図に示されるように未熟段階と思われる時期では600～1,000, 1,400～1,600および2,400～2,600Hzの各周波数帯における音域でそれぞれ共振を示した。しかし、成熟期と思われる段階になると1,400～1,600および2,400～2,600Hzの周波数帯にあった共振ピークがそれぞれ消滅し、さらに追熟が進む頃には600～1,000Hzの周波数帯の共振も弱くなり、著しい減衰を示した。

3. C型果実支持台による収穫後の音波共振曲線

収穫後、室温(20～29°C, 60～80%RH)貯蔵中のメロンの共振曲線は、C型果実支持台を用いた場合もFig. 6に示すように顕著な変化を示した。

メロンは貯蔵中に追熟が進み、物性変化としてはとくにそのかたさが漸次低下していくことが経験的には知られているが、同一試料についての明確なデータはほとんど無い。

Fig. 6に示すメロンの音波共振曲線は収穫後の室温貯蔵中あるいは追熟期間中の物性変化をよく表わしている。すなわち、その共振周波数は収穫後の日時が経過するにつれて、低位に移動しているが、この現象はヤング率すなわちかたさが次第に小さくなっていることを示すものと考えられる。また、完熟期を過ぎ、さらに追熟が進んでくると検出される共振の強さが小さくなっていることが観察されるが、これは果肉・果汁内の粘性すなわち振動に対する減衰力が大きくなっていることを示すと考えられる。

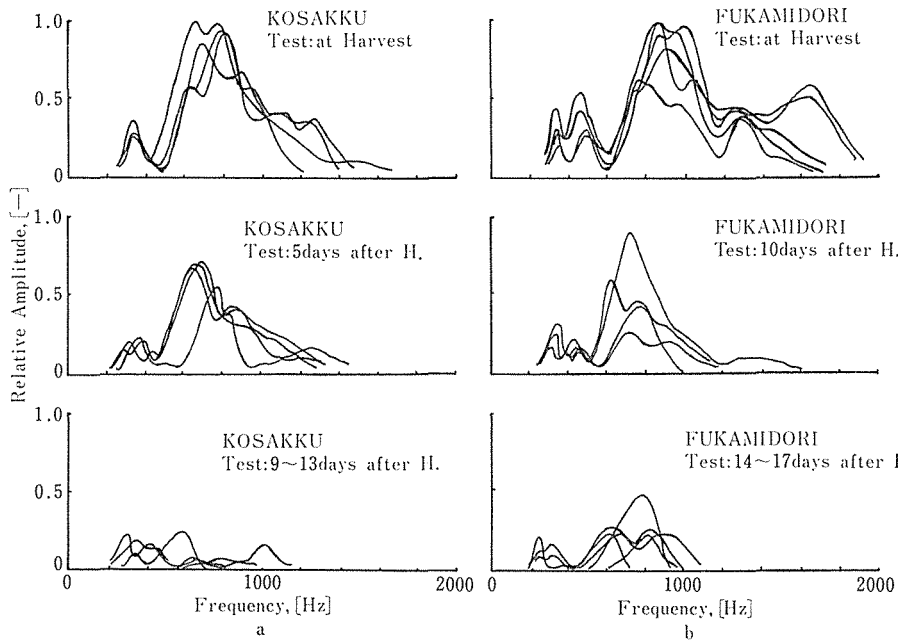


Fig. 6. Resonant curves for harvested fruits on the C-type fruit-holder

考 察

1. 果実支持台の検討

A型果実支持台を用いた実験では、供試したいずれの品種の試料に対してもそれらの音波共振曲線に顕著な経時的变化あるいは一貫した共振曲線のパターンを見出すことはできなかった。これは果実支持台自身の共振振動が起ったり、あるいはそれが果実に伝わったりしたためであろう。しかしながら、若干改良を加えたB型およびC型果実支持台を用いた音波共振曲線の実測値には経時的に一定の傾向で変化する興味深い現象が見られた。

2. 音波共振曲線の検討

生育中におけるメロンの共振曲線では、比較的高い周波数域に起った共振が熟度の進行とともに消滅している現象が見られた。これは、高い周波数の音波はそれだけ波長が短かく抵抗物体にさえぎられ易くなること、また、メロンは熟度の進行とともに果肉がやわらかくなり、その共振運動における減衰要因となる果実内の粘性、塑性が増大し、振動エネルギーを吸収しやすくするために、波長が短かく吸収され易い高周波の音波からまず吸収されることなどが原因であると考えられる。

次に、収穫後の室温貯蔵(22~29°C)中における音波共振曲線では、追熟が進むにつれてわずかなではあるが共振点がより低い周波数へ移行し、かつその振動の強さも小さくなり、共振現象そのものも非常に検出しにくくなる(Fig. 6・C)。これはもちろん、前述のように果肉がやわらかくなることが一つの原因であり、同じ形、同じ大きさの物体であれば弾性率の小さいもののほど共振周波数が低いことから考えれば当然の現象であろう。さらに、追熟が進み、過熟状態になると弾性要因より粘性要因が大きくなり、減衰項が大きくなるため共振運動のエネルギーは吸収され易くなる。このため、果実の共振現象が非常に起りにくくなってくるものと考えられる。

農産物は工業材料に比べて非常に複雑な組織構造をもち、その力学的性質は同一個体内でさえ均一ではない。しかしここで、音波共振曲線における経時的变化を見れば、収穫後の果実では熟度の進行とともに共振点が低い周波数へ移行し、かつ共振の強さも小さくなっていることがわかる。一方では、経験的に果肉はやわらかくなり、果実全体のかたさが小さくなっていくことが知られている。そこで、果実のかたさの指標を単純に動弾性率におきかえ、おおまかなかたさ、熟度などの目安を得る目的で次のような無限円柱の縦共振振動方程式を利用してヤング率 E_D を試算した⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} E_D &= \frac{\gamma}{K_n} \left(\frac{2 \cdot l \cdot f_n}{n} \right)^2 \\ K_n &\approx 1 - \frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot \mu^2 \cdot \phi^2}{8l^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(ただし K_n は $\frac{\phi}{\lambda} \ll 1$, λ : 波長, のとき成立)

ここで, E_D : ヤング率 (dyne/cm²), γ : 試料の密度 (g/cm³), l : 試料の長さ (ここでは音波進行方向の果実直径) (cm), f_n : n 次の共振周波数 (Hz), n : 共振の次数 (整数1, 2, …), K_n : レイリーの修正係数⁷⁾ (—), μ : ポアソン比 (=0.45と仮定), ϕ : 果実支持台の音源口径 (4cm) とする。すなわち, 支持台上のメロンにおいて直径が音源口径と同じで長さは試料直径 l (刺激面から振動検出点までの距離) と同じ円柱を仮定したものである。

ポアソン比 μ は實際上測定が非常に困難であるため次のような仮定式から求めた。

$$\mu = \frac{0.5 \cdot M + 0.1 \cdot S}{100} \quad (2)$$

ここで, M : 含水率 (%WB), S : 固形分率 (100- M) (%) とする。すなわち, 水のポアソン比を0.5, 残り組織構造物のポアソン比を0.1として仮定したものである。メロンの含水率は平均88 %WBであったため, この値を式(2)に代入し, ポアソン比を0.45として用いた。

上式(1)を用いる前に共振周波数とその共振時の次式 n を決定しなければならない。そこでまず, 音波共振実験に供した試料を用いて 0 から 5kg の平板荷重によるロードサイクル試験を非破壊的に行い, 静的圧縮弾性率を次式により求めた⁶⁾。

$$E_s = \left[1.125 (1 - \mu^2)^2 \frac{F^2}{D d^3} \right]^{1/2} \quad (3)$$

ここで, E_s : 圧縮弾性率 (kg/cm²), F : 平板による外力 (kg), D : 果実の平均直径 (cm), d : 平板による圧縮時の果実変形量 (cm) とする。

また, 式(1)には共振時の周波数とそれに対する次数 n ($=1, 2, 3, 4, \dots$) を代入して, それぞれの n に対する E_D 値を算出した。

次に, 式(1)により算出した E_D 値の中から, 式(3)により求めた E_s に最も近い値を検索し, その E_D 値に対する n を見つけて共振周波数に対する次数とした。

その結果, 最初に現われた共振に対しては $n=2$, 次のピークに位置する共振に対しては3, そしてその次に最もよく現われ, しかも最も強い共振に対しては $n=4$ あるいは5を想定すると, 比較的うまくその弾性率が表現できた。

かたさの指標として Abbott¹⁾ らにより提唱されている $f_2^2 \cdot m$ あるいは $f_2^2 \cdot m^{2/3}$ の f_2 は, 式(1), (3)から判定するとメロンに対しては $n=4$, あるいは $n=5$ の場合の周波数が適切であるかもしれ

ない。さらに熟度が進んだ段階では、この周波数帯つまり $n=4$ か 5 の共振点だけがわずかに観察されうただけとなり、他の次数の共振点は消滅するか、非常に小さい振幅となった。

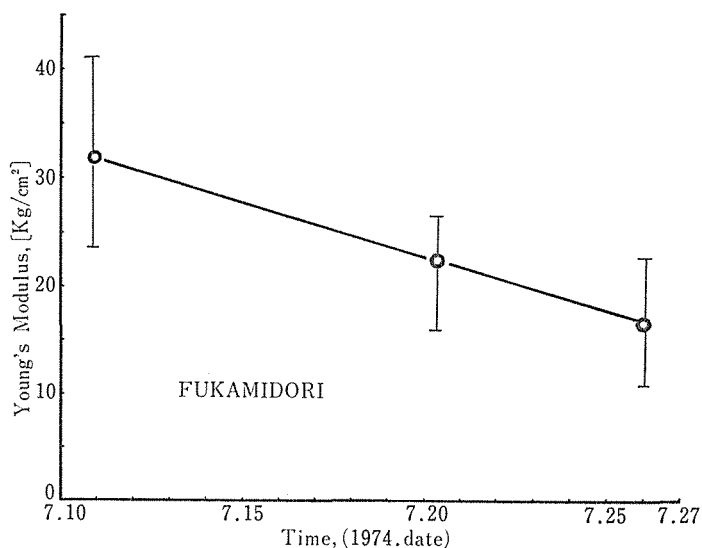


Fig. 7. Change of young's modulus of the melon, FUKAMIDORI, after harvest.

このようにして求めた仮の動弾性率 E_d の値を Fig. 7 に示した。その結果、マスクメロンは貯蔵中において急速に E_d 値が低下していくことがわかった。

非破壊的な方法で果実の物性が判定できれば、その果実の経時的な品質・熟度などの変化を的確には握ることができる。したがって、音波による非破壊的な物性測定法の農産物への応用、これらに関するデータの蓄積、およびその理論的解析と実用化は非常に重要な課題である。

摘 要

農産物の非破壊的熟度判別法の一つとして、音波共振法を応用し、マスクメロンの熟度評価を行なった。そして、その可能性を検討した。

1) Fig. 3 に示した B および C 型の果実支持台を用いた場合、A 型を用いた場合より、果実熟度を判定するのにより適切な共振曲線が得られた。

2) メロンは生育中熟度が進行するにつれて、高域の周波数に対する共振が次第に減衰し、消滅していった。

3) 収穫後のメロンの共振曲線は、その共振点が低域の周波数へ移行し、かつ果実熟度の進行に伴う減衰項の増大のために共振振幅が小さくなった。

4) 本実験の場合の果実の共振を縦振動と考えて、式(1)によりそのヤング率を計算する場合、その共振次数 n は最初に現われた共振に対しては $n=2$ 、最も強く現われた共振に対しては $n=4$ かあるいは 5 が仮定できた。

以上の結果より、メロンの熟度判定には音波共振法の応用が可能であると考えられる。

謝 辞

本実験を行うにあたり次のかたがたに御協力いただいた。記して謝意を表する。

佐賀県農業試験場

本学部附属農場，柳川・田原両技官

園芸工学専攻生，垣内康幸君（S. 50. 3 卒，現在不二精機 K. K. 技術部）

参 考 文 献

- 1) Abbott, J. A., G. S. Bachmann, R. F. Childer, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik. (1968) Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables. *Food Technology*. **22**, 635-646.
- 2) Essex E. Finney Jr., Itamar Ben-Gera and David R. Massie. (1968) An objective evaluation of changes in firmness of ripening bananas using a sonic technique. *J. Food Science*. **32-6**, 642-646.
- 3) Essex E. Finney Jr. (1970) Mechanical resonance within red delicious apples and its relation to fruit texture. *Trans. of the ASAE*. **13**: 177-180.
- 4) 藤井健雄. (1972) 蔬菜園芸学各論. 養賢堂.
- 5) 農山漁村文化協会. (1973) 農業技術大系, 野菜編 4.
- 6) Shpolyanskaya, A. L. (1952) Structural mechanical properties of the wheat grain. *Colloid Journal* (English Translation). **14**: 137-148.
- 7) Spinner, S. and W. E. Tefft. (1961) A method for determining mechanical resonance frequencies and for calculating elastic moduli from these frequencies. *ASTM Proceeing*. **61**: 1221-1238.
- 8) Stephenson. K. Q., R. K. Byler, M. A. Wittman. (1973) Vibrational response properties as sorting criteria for tomatoes. *Trans. of the ASAE*. **16**: 258-265.